

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

АВРУТОВ ВАДИМ ВІКТОРОВИЧ

УДК 531.383

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ АВТОНОМНОГО ВИЗНАЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ
ПАРАМЕТРІВ РУХОМИХ ТА НЕРУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ**

Спеціальність 05.11.03 – гіроскопи та навігаційні системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі приладів і систем орієнтації та навігації
Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Бурау Надія Іванівна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», завідувач кафедри приладів і систем
орієнтації та навігації

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кулік Анатолій Степанович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний
інститут», професор кафедри систем управління
літальними апаратами

доктор технічних наук, доцент
Успенський Валерій Борисович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», професор кафедри
комп'ютерного моделювання процесів і систем

доктор технічних наук, доцент
Чіковані Валерій Валеріанович,
Національний авіаційний університет, професор
кафедри систем управління літальних апаратів

Захист дисертації відбудеться «29» січня 2021 р. о 15:00 на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д26.002.07 при Національному технічному університеті України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м.
Київ, пр-т Перемоги, 37, корп.1, ауд.317.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного
університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за
адресою: 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «__» _____ 2020 р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради

Ю.В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час основними технічними засобами навігації є супутникові навігаційні системи (СНС) – GPS (США), Глонасс (РФ), Galileo (ЕС), BeiDou та Hongyan (КНР). При варіанті використання чотирьох систем GPS, Глонасс, BeiDou та Galileo похибка позиціонування становить 3-4 см, що свідчить про високу точність визначення місцезнаходження.

Нажаль супутникові навігаційні системи не є автономними. У період міжнародних криз і військових конфліктів СНС схильні до атак засобів радіоелектронної протидії. Крім того, останнім часом почастишали випадки використання спуфінга (*англ. spoofing*), коли управління роботою приймачів СНС здійснює третя сторона. Так, відомі випадки примусової посадки безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на аеродроми протидіючої сторони з використанням технології спуфінга.

Тому величезне значення останнім часом має розвиток автономних систем навігації та орієнтації. Такими автономними системами є в першу чергу інерціальні навігаційні системи (ІНС), гірокомпаси та гірогоризонткомпаси (курсовертикалі). Перші ІНС, розроблені на рубежі 50-60-х років ХХ століття, будувалися на базі гіростабілізованих платформ. В Україні проблемами ІНС, гірокомпасів та гіроскопів в цей час займалися О.Ю. Ішлінський, В.М. Кошляков і С.М. Онищенко (Ін-т математики АН УССР, м. Київ), М.Н. Голик, А.Ю. Дмитрієв і А.С. Довгополий (ЦКБ «Завод Арсенал», м. Київ), І.Є. Глазунов, А.А. Майструк та Ю.А. Карпачов (СКБ Київського заводу автоматики ім. Г.І. Петровського, м. Київ).

Наступним поколінням ІНС стали безкарданні або безплатформні ІНС (БІНС). Значний внесок у розвиток теорії БІНС, їх чутливих елементів та різних гіроскопічних приладів в Україні внесли вчені М.І. Захарін, Ф.М. Захарін, О.А. Леонець, А.О. Одинцов, М.А. Павловський, Л.М. Рижков, О.В. Збруцький, О.М. Безвесільна, В.В. Мелешко, В.М. Слюсар, М.Г. Черняк (Київський політехнічний ін-т), В.Б. Успенський, В.І. Картунов, М.В. Некрасова, Ю.А. Плаксієв (Харківський політехнічний ін-т), А.П. Панов, Д.В. Лебедєв, А.И. Ткаченко (Ін-т кібернетики, м. Київ). Величезний внесок у вирішенні практичних проблем проектування, виготовлення і випробувань БІНС, гірокомпасів та чутливих елементів зробили М.І. Лихоліт, О.Ю. Вахлаков, А.М. Шостак, Ю.Ю. Юр'єв, І.В. Ні-

конов (КП СП «Завод Арсенал», м. Київ), Ю.М. Златкін, А.Н. Калногуз, В.Г. Воронченко, С.В. Олейник, Ю.А. Кузнецов (НПП «Хартрон-Аркос», м. Харків), Л.П. Старицький, А.В. Шемелін, В.П. Андрущук, (Київський завод автоматики), А.В. Дегтярьов, А.Л. Макаров, В.Л. Тихонов, С.А. Давиденко, О.В. Матвієнко, М.Г. Снегирьов, В.Н. Сиренко, В.С. Шеховцов (КБ «Південне», м. Дніпро), В.В. Чіковані (Національний авіаційний університет, м. Київ), С.В. Головач (АТ «Елміз», м. Київ), В.В. Цисарж та О.І. Нестеренко (СП «Інналабс», м. Київ).

Завдяки безперечним перевагам БІНС витісняють платформні ІНС. Однак основний принцип дії ІНС та БІНС – це дворазове інтегрування показань акселерометрів, а також інтегрування показань гіроскопів у БІНС. Наявність похибок акселерометрів і гіроскопів призводить до наростання похибок визначення місцезнаходження з часом.

Перший спосіб підвищення точності БІНС – вдосконалення їх чутливих елементів. Найбільш точними гіроскопами в даний час є електростатичні гіроскопи. Однак, через велику вартість електростатичні гіроскопи застосовуються лише в автономних ІНС та БІНС підводної і космічної навігації.

Другий спосіб підвищення точності БІНС – корегувати їх показання за супутниковими, астронавігаційними та іншими системами. Однак такі інтегровані навігаційні системи вже не є автономними.

Тому актуальним є створення таких автономних інерціальних навігаційних систем, які б не залежали від супутникових та інших навігаційних систем, мали б достатню точність і в той же час мали б доступну ціну. Але нажаль, поки ще не існує теорії таких автономних навігаційних систем, які б визначали місцезнаходження за відмінними від стандартних алгоритмів дворазового інтегрування показань акселерометрів. Тобто існує проблема створення нових способів автономного визначення навігаційних параметрів із застосуванням чутливих елементів середньої точності. Причому, для нерухомих об'єктів актуальним є автономне визначення початкових координат або місцезнаходження, а для рухомих – автономне визначення місцезнаходження за відмінними від стандартних алгоритмів дворазового інтегрування показань акселерометрів. Це обумовлює необхідність розробки нових науково обґрунтованих методів та алгоритмів автономного визначення навігаційних параметрів рухомих і нерухомих

об'єктів, які б забезпечили прийнятну точність визначення місцезнаходження в умовах зовнішніх завад роботі радіотехнічних навігаційних систем.

Згідно Розпорядження Кабінету Міністрів України № 600-р від 30.08.2017 р. до Переліку критичних технологій у сфері виробництва озброєння та військової техніки відноситься технологія розробки навігаційних систем на базі інерціальних датчиків для визначення місцезнаходження в умовах застосування завад супутниковим навігаційним системам. Тому тема дисертації є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких викладені в дисертації, проводилися на кафедрі приладів і систем орієнтації та навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського) відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 942 від 07.09.2011 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року», згідно Розпорядження Кабінету Міністрів України № 600-р від 30.08.2017 р. про Перелік критичних технологій у сфері виробництва озброєння та військової техніки, наукового напрямку КПІ ім. Ігоря Сікорського «Розробка методів побудови і дослідження навігаційних приладів і систем на нових фізичних принципах та технологій їх застосування», а також в рамках науково-дослідних робіт ДР №0115U000318 «Розробка методичного забезпечення та макетного зразку системи моніторингу на основі концепції Structural Health Monitoring», ДР №0117U004259 «Методологія багатокласової діагностики складних просторових об'єктів» та договору №489/6 «Розробка алгоритмів початкової виставки і виставки у польоті безплатформової інерціальної навігаційної системи», в яких автор був виконавцем та відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є наукове обґрунтування та створення нових методів, алгоритмів і засобів автономного визначення навігаційних параметрів рухомих і нерухомих об'єктів для забезпечення прийнятної точності визначення місцезнаходження на базі інерціальних датчиків в умовах зовнішніх завад роботі радіотехнічних навігаційних систем.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати наступні групи задач:

1. На основі інформаційно-аналітичного огляду стану навігаційних приладів та систем обґрунтувати необхідність та шляхи вирішення проблеми створення нових способів автономного визначення навігаційних параметрів з застосуванням чутливих елементів середнього класу точності.

2. Отримати нові аналітичні вирази автономного визначення широти та довготи місця нерухомих об'єктів, на основі яких розробити нові метод та алгоритм автономного визначення місцезнаходження та розробити математичні моделі похибок визначення широти та довготи місця нерухомих об'єктів, які дозволяли б сформулювати вимоги до похибок чутливих елементів на підставі вимог до необхідної точності визначення широти та довготи.

3. Отримати нові аналітичні вирази автономного визначення широти та довготи місця рухомих об'єктів, на основі яких розробити нові метод та алгоритм автономного визначення навігаційних параметрів рухомих об'єктів, оцінити похибки методу та причини їх виникнення.

4. Отримати нові аналітичні вирази автономного визначення курсу та швидкості рухомих об'єктів. Розробити математичні моделі похибок визначення курсу та швидкості, встановити причини їх виникнення.

5. Розробити нові обчислювальні алгоритми орієнтації рухомих об'єктів для їх подальшої реалізації у розроблених нових методах та алгоритмах автономного визначення навігаційних параметрів рухомих об'єктів.

6. Розробити метод просторового калібрування чутливих елементів інерціально-вимірювальних модулів для визначення їх основних параметрів і подальшого використання у розроблених нових методах та алгоритмах автономного визначення навігаційних параметрів нерухомих та рухомих об'єктів.

7. Розробити скалярний метод контролю та діагностики інерціально-вимірювальних модулів на основі скалярного способу калібрування.

8. Впровадити результати досліджень.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є автономне визначення навігаційних параметрів рухомих та нерухомих об'єктів.

Предметом дослідження є методи та алгоритми автономного визначення навігаційних параметрів рухомих та нерухомих об'єктів із застосуванням чутливих елементів середньої точності.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач, а саме для отримання формули автономного визначення широти нерухомих та рухомих об'єктів використовувалися методи теоретичної механіки, векторної алгебри та матричне обчислення. Для математичної обробки експериментальних даних при перевірці отриманого виразу автономного визначення широти нерухомих об'єктів для фільтрації шуму використовувалось Вейвлет перетворення та оптимальна фільтрація на основі усередненого фільтра Калмана. При розробці математичних моделей похибок навігаційних параметрів застосовувалося розкладання у ряд Тейлора. При дослідженні впливу вібрації на точність автономного визначення широти нерухомих об'єктів використовувалися методи теорії випадкових процесів. Для отримання формули автономного визначення довготи рухомих об'єктів використовувалися методи аналітичного вирішення диференціальних рівнянь.

Для експериментального дослідження автономного визначення широти та довготи рухомих об'єктів застосовувалися методи чисельного інтегрування диференціальних рівнянь та методи математичного моделювання у середовищі «Mathlab».

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше отримано аналітичні вирази для автономного визначення широти та довготи місця для нерухомих об'єктів шляхом використання значень проекцій кутової швидкості обертання Землі та проекцій прискорення сили тяжіння, в яких постійний нахил інерціально-вимірювального модуля відносно площини горизонту, а також відхилення інерціально-вимірювального модуля по азимуту не впливають на визначення широти місця.

2. Вперше отримано аналітичні вирази для автономного визначення довготи та широти рухомих об'єктів шляхом використання вихідних сигналів гіроскопів інерціально-вимірювального модуля та елементів матриці напрямних косинусів, за якими обчислення широти не передбачає інтегрування показань акселерометрів і гіроскопів, а обчислення довготи вимагає лише одноразового інтегрування показань гіроскопів.

3. Вперше розроблені нові математичні моделі похибок визначення широти, довготи та курсу для рухомих та нерухомих об'єктів, в яких встановлені залежності похибок визначення широти, довготи та курсу від похибок чутливих елементів.

4. Вперше отримана та доведена теорема про суму квадратів швидкостей зміни широти і довготи, на основі якої отримано вираз для автономного визначення швидкості рухомого об'єкта.

5. Встановлено умову просторового калібрування блоку гіроскопів по забезпеченню рівності рангу основної матриці рівняння калібрування її порядку або числу стовпців для повного рішення рівняння калібрування.

Практичне значення одержаних результатів.

Практична цінність одержаних результатів полягає у наступному:

1. На основі отриманих аналітичних виразів розроблено методи автономного визначення широти та довготи місця для нерухомої основи (спосіб визначення широти місця, захищений патентом України на корисну модель № 123355 від 26.02.2018), розроблено рекомендації по кількості та номенклатурі чутливих елементів інерціально-вимірювального модуля, по практичному використанню отриманих в дисертації аналітичних виразів автономного визначення широти та довготи місця для нерухомої основи.

2. На основі отриманих аналітичних виразів розроблено методи автономного визначення широти та довготи місця для рухомої основи (спосіб автономного визначення широти і довготи рухомого об'єкта, захищений патентом України на корисну модель № 140969 від 10.03.2020) шляхом вимірювання кутової швидкості рухомого об'єкту та кутів його орієнтації, на основі яких обчислюються елементи матриці напрямних косинусів, а потім широта та довгота місця.

3. На основі отриманої теореми про суму квадратів швидкостей зміни широти і довготи розроблено метод для автономного визначення швидкості рухомого об'єкта.

4. Вперше синтезовані нові обчислювальні алгоритми орієнтації рухомих об'єктів на основі вихідних сигналів датчиків кутової швидкості, що підвищує точність визначення орієнтації рухомих об'єктів.

5. Розроблено скалярний метод контролю і діагностики ІВМ, що входить до складу БІНС. Згідно з методом, будуються алгоритми контролю і діагностики.

В результаті перевірки алгоритму контролю здійснюється контроль працездатності всього блоку гіроскопів або акселерометрів, а на підставі алгоритму діагностики відбувається визначення елемента, що відмовив і з'ясовується причина його відмови.

Результати дисертації відображені в публікаціях автора в повному обсязі, впроваджені на етапі лабораторно-дослідних випробувань на Державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» імені М.К. Янгеля» (м. Дніпро), ТОВ «Гіротех» (м. Київ), АТ «Елміз» (м. Київ). Також результати досліджень впроваджено в навчальну дисципліну «Додаткові розділи теорії чутливих елементів» при підготовці магістрів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на кафедрі приладів і систем навігації та орієнтації приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримані здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист та висновки дисертаційної роботи належать автору. У роботах, опублікованих у співавторстві: [36,39-42,44] - розвинена теорія автономного визначення навігаційних параметрів рухомих та нерухомих об'єктів, отримано вирази для розрахунку широти та довготи, розроблено методи та алгоритми автономного визначення широти та довготи рухомих та нерухомих об'єктів, [16] - запропоновано використання ПД-регулятора для виставлення інерціальної навігаційної системи, [18,33,35] - розглянуто початкове виставлення курсовертикалі; [4,17,25,28,30,32] - запропоновано метод просторового калібрування інерціально-вимірювальних модулів, [12] - розглянуто вплив похибок обертів випробувального стенду на точність калібрування блоку гіроскопів та акселерометрів, [20] - розроблено комплекс спеціалізованого стендового обладнання для контролю характеристик низькочастотних акселерометрів; [21,43,48,49] - запропоновано використання штучної нейронної мережі для температурного калібрування інерціально-вимірювальних модулів, [19] - розглянуто забезпечення необхідного теплового режиму інтегрованої інерціально-навігаційної системи; [15,45] - запропоновано метод контролю та діагностики інерціально-вимірювальних модулів на основі скалярного методу калібрування;

[34,38] - розроблено нові обчислювальні алгоритми орієнтації рухомих об'єктів на основі вихідних сигналів датчиків кутової швидкості.

Апробація результатів дисертації. Наукові та практичні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та отримали позитивну оцінку на: міжнародному симпозіумі з авіації та аерокосмічних систем 2017 р. у Пекіні, Китайська народна республіка (International Symposium on Aviation and Aerospace System Engineering, SAASE 2017, Beijing, China); міжнародному IEEE симпозіумі по гіроскопічним технологіям в Брауншвейзі (Symposium Gyro Technology, Braunschweig, Germany, 2018); міжнародній IEEE комп'ютерній конференції в Лондоні (Computing Conference 2018, London, UK); міжнародній IEEE конференції з інформаційних технологій, комп'ютерних мереж та автоматичного керування у Ченгду, Китайська народна республіка (ITNEC-2017, Chengdu, China.); 37-й та 38-й міжнародних науково-технічних конференціях IEEE з електроніки та нанотехнології ELNANO-2017 та ELNANO-2018 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна; міжнародній науково-технічній конференції IEEE «Методи та системи навігації та керування рухом – 2018 (Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC-2018))», Національний авіаційний університет, Київ, Україна; міжнародній науково-технічній конференції IEEE «Актуальні проблеми розробки безпілотних літальних апаратів – 2017, 2019 (Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD-2017, 2019))», Національний авіаційний університет, Київ, Україна; Першій міжнародній науково-технічній конференції IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2017) у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна; 15-й міжнародній науково-технічній конференції IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET - 2020), Львів-Славське, XXII міжнародній науково-технічній конференції "Гіротехнології, навігація керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки" (2019, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна); XIII, XV, XVIII Міжнародні науково-технічні конференції "ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. Стан і перспективи", 2014, 2016, 2019 років. (Національний

технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна); Науково-технічній конференції України «Спеціальне приладобудування. Стан та перспективи» (КП СП «Арсенал», 2016, 2019).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 49 наукових праць, у тому числі 22 статті у наукових фахових виданнях, з яких 6 статей у виданнях іноземних держав (з них три входять до міжнародної наукометричної бази SCOPUS), 16 – у фахових виданнях України, що входять до наукометричних баз, два патенти на корисну модель, 20 матеріалів доповідей міжнародних науково-технічних конференцій (з них 20 входять до міжнародної наукометричної бази SCOPUS), та 5 тез доповідей в збірниках матеріалів вітчизняних науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, семи розділів, висновків, списку літератури та додатків, і викладена на 309 сторінках, включаючи 100 рисунків, 32 таблиці, список літератури зі 250 публікацій на 26 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, пояснюється зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, які проводилися на кафедрі приладів і систем орієнтації та навігації КПІ ім. Ігоря Сікорського, визначається об'єкт і обирається предмет дослідження, сформульовано мету і задачі дослідження, зазначаються методи дослідження, визначається наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача та апробація результатів дисертації, наведено дані про публікації автора, структуру і об'єм дисертації.

У **першому розділі** виконано інформаційно-аналітичний огляд літературних джерел, розкрито стан сучасної наукової проблеми автономного визначення навігаційних параметрів.

Навігаційні параметри, такі як, координати місцезнаходження об'єкта (широта, довгота і висота), курс або азимут, складові вектору лінійної швидкості, що характеризують поступальний рух центру мас об'єкта, визначаються за допомогою навігаційних систем різного фізичного принципу дії.

На основі огляду літературних джерел встановлено, що на сьогодні основними технічними засобами навігації є супутникові навігаційні системи (СНС),

які не є автономними і не можуть забезпечити визначення навігаційних параметрів в умовах дії радіоелектронних завад. Тому величезне значення має розвиток автономних систем навігації та орієнтації. Такими автономними системами є в першу чергу інерціальні навігаційні системи (ІНС). Вимоги до характеристик ІНС безпосередньо впливають на вибір інерціальних датчиків, якими є гіроскопи та акселерометри із своїми похибками.

Дворазове інтегрування показань акселерометрів та одноразове інтегрування показань гіроскопів призводить до накопичення похибок ІНС. Для корекції БІНС їх інтегрують з супутниковими навігаційними системами, але такі системи стають неавтономними.

Огляд робіт українських та закордонних вчених показав, що поки ще не існує теорії таких автономних навігаційних систем, які б визначали місцезнаходження за відмінними від стандартних алгоритмів дворазового інтегрування показань акселерометрів. Тобто існує проблема створення нових способів автономного визначення навігаційних параметрів з застосуванням чутливих елементів середньої точності. Причому, для нерухомих об'єктів актуальним є автономне визначення початкових координат або місцезнаходження, а для рухомих – автономне визначення місцезнаходження за відмінними від стандартних алгоритмів дворазового інтегрування показань акселерометрів. Це обумовлює необхідність розробки нових науково обґрунтованих методів та алгоритмів автономного визначення навігаційних параметрів рухомих і нерухомих об'єктів, які б забезпечили прийнятну точність визначення місцезнаходження в умовах зовнішніх завад роботі радіотехнічних навігаційних систем.

У другому розділі отримано нові аналітичні вирази автономного визначення широти та довготи місця нерухомих об'єктів, на основі яких розроблено нові метод та алгоритм автономного визначення місцезнаходження.

На підставі скалярного добутку двох векторів \vec{g} - прискорення сили тяжіння та $\vec{\Omega}$ - кутової швидкості обертання Землі (рис.1) отримано новий аналітичний вираз для автономного визначення геодезичної широти місця на нерухомій основі:

$$\varphi = -\arcsin \left[\frac{1}{\Omega \cdot g} (\Omega_x \cdot g_x + \Omega_y \cdot g_y + \Omega_z \cdot g_z) \right], \quad (1)$$

де $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ - проекції кутової швидкості обертання Землі на вісі $Oxyz$, g_x, g_y, g_z - проекції прискорення сили тяжіння на ті ж самі вісі.

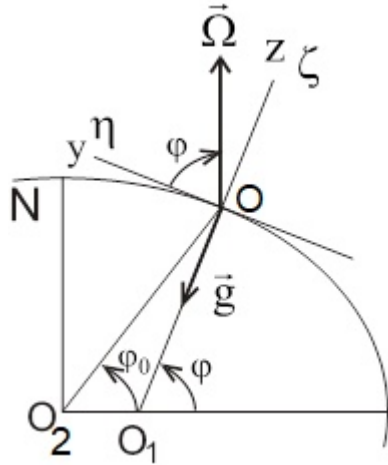


Рис. 1. Розташування векторів $\vec{\Omega}$ та \vec{g}

На основі отриманої залежності (1) запропоновано та обґрунтовано *метод автономного визначення широти*, який полягає:

- 1) у вимірюванні проекцій кутової швидкості обертання Землі і проекції прискорення сили тяжіння;
- 2) усередненні та фільтрації вимірюваних сигналів;
- 3) обчисленні широти за виразом (1).

Запропоновано використання інерціально-вимірювального модуля (ІВМ), який повинен містити як мінімум три акселерометри та три гіроскопи - датчики кутової швидкості.

В роботі встановлено, що автономне визначення початкової широти за отриманим виразом (1) інваріантне до постійного нахилу ІВМ відносно площини горизонту, а також до відхилення ІВМ в азимуті.

Для експериментального визначення широти використовувався ІВМ, що складався з ортогонально розташованих трьох кільцевих лазерних гіроскопів і трьох акселерометрів. Експерименти проходили у м. Київ та м. Харків. В табл.1 наведено усереднені значення проекцій кутової швидкості обертання Землі (град/год) і проекцій прискорення сили тяжіння (м/с^2) на осі, пов'язані з ІВМ (1 - м. Київ, 2- м. Харків).

Таблиця 1. Результати експериментального визначення широти

	Ω_x , °/год	Ω_y , °/год	Ω_z , °/год	Ω , °/год	g_x , м/с^2	g_y , м/с^2	g_z , м/с^2	g , м/с^2	$\Delta\varphi$
1	9,426	11,663	-1,055	15,033	-0,0437	9,817	-0,0070	9,8118	0°09'14"
2	9,556	11,460	0,057	14,942	0,0236	9,809	0,0626	9,8089	0°16'30"

Основними причинами виникнення похибки визначення широти місця є похибки гіроскопів і акселерометрів. Крім того, за еталонне значення широти приймалося геоцентричне значення широти, отримане від приймача GPS, яке

відрізняється від геодезичного значення широти. На основі співвідношення між геоцентричною φ_0 і геодезичною φ широтами, отримано вираз для різниці (поправки) $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$:

$$\Delta\varphi_i = \arctg \frac{\left(\frac{a_i^2}{b_i^2} - 1\right) \operatorname{tg} \varphi_0}{1 + \frac{a_i^2}{b_i^2} \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi_0}, \quad i=1,2. \quad (2)$$

де a_i, b_i - велика і мала півосі земного еліпсоїда.

Для еліпсоїда Красовського $a_1 = 6378245$ м, $b_1 = 6356863$ м, для моделі WGS-84 $a_2 = 6378137$ м, $b_2 = 6356752.3142$ м. В роботі представлені графічні залежності $\Delta\varphi_i$ від геоцентричної φ_0 широти для двох моделей референц-еліпсоїда Землі та таблиця абсолютних значень різниці $\Delta\varphi = |\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2|$.

На широті 45° (на південь від м. Одеса) спостерігається максимум величини $\Delta\varphi$. Для даної широти похибка лінійної координати, викликана відмінністю моделей референц-еліпсоїда Землі, складає 175,21 м. Зроблено висновок про необхідність врахування поправки $\Delta\varphi_i$ при отриманні геодезичної широти за формулою (2) для порівняння її з геоцентричною широтою.

Проведено експериментальні дослідження з ІВМ на мікромеханічних гіроскопах і акселерометрах STIM300.

Для розрахунку широти за виразом (1) використано осереднені сигнали з виходів гіроскопів і акселерометрів. Час осереднення становив 10-16 хвилин. Результати обчислень представлені в табл. 2.

Таблиця 2. Результати експерименту з ІВМ STIM300.

	N	$\Omega_x,$ °/год	$\Omega_y,$ °/год	$\Omega_z,$ °/год	$\Omega,$ °/год	$g_x,$ м/с ²	$g_y,$ м/с ²	$g_z,$ м/с ²	$g,$ м/с ²	$\Delta\varphi_1,$ град
1	26826	11.147	-9.379	0.081	14.568	9.809	0.0003	-0.0002	9.809	1.484
2	27469	11.098	-9.392	0.065	14.539	9.809	0.0002	-0.0002	9.809	1.321
3	38922	11.655	-10.152	0.097	15.457	9.809	0.0005	0.00007	9.809	0.505
4	38281	11.607	-10.127	0.131	15.404	9.809	0.0005	0,00006	9.809	0.454

Отримані результати показують, що зі збільшенням часу усереднення похибка визначення широти зменшується. Однак у порівнянні з попереднім експериментом з ІВМ на лазерних гіроскопах результати на порядок гірше, що

обумовлено рівнем похибок ІВМ та шумом на його виходах. В роботі для підвищення точності визначення широти було використано методи фільтрації шумових складових.

Для фільтрації шумових складових було використано Вейвлет перетворення (ВП) сімейства Добеші з розкладанням на 10 рівнів. Результати вейвлетної фільтрації наведено на рис. 2.

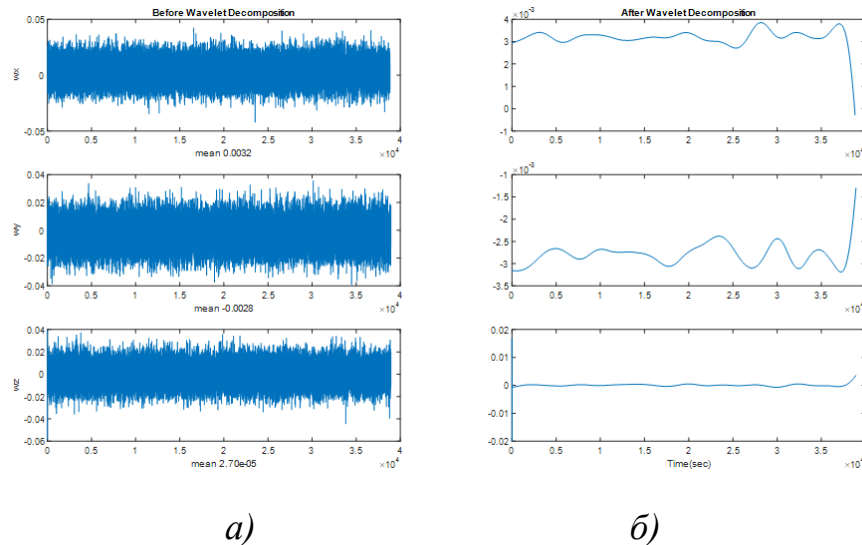


Рис. 2. Вихідні (a) і очищені (б) сигнали гіроскопів

Аналогічну процедуру вейвлетної фільтрації було застосовано до вихідних сигналів гіроскопів, результати якої наведені на рис. 3.

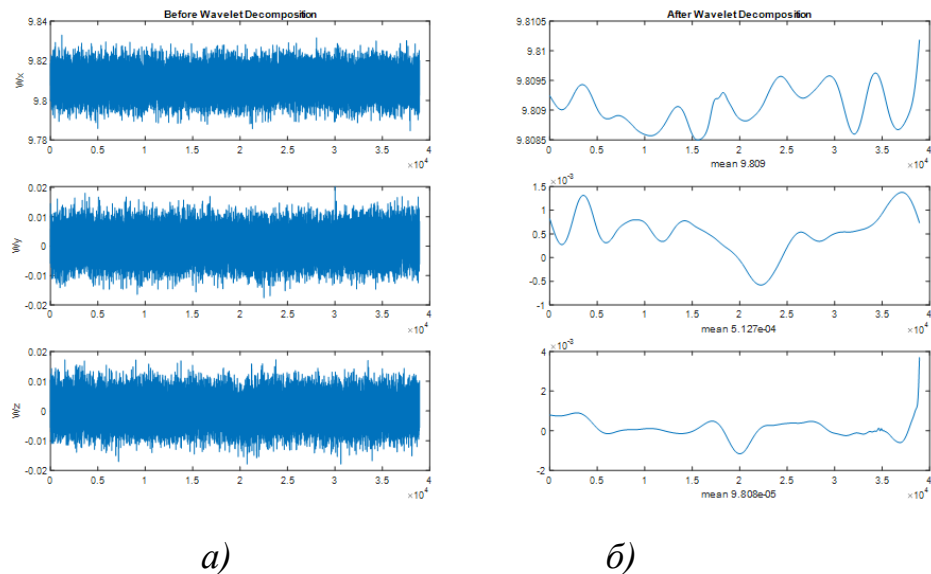


Рис.3. Вихідні (a) і очищені (б) сигнали акселерометрів

У табл.3 представлені результати аналізу, отримані до і після вейвлетної фільтрації (ВФ).

Таблиця 3. Результати вейвлетної фільтрації.

	Середнє до ВП	Середнє після ВП	СКВ до ВП	СКВ після ВП	одиниці виміру
Ω_x	11.60712	11.53242	34.45722	1.49473	°/год
Ω_y	-10.12774	-10.12005	33.49136	1.28840	°/год
Ω_z	0.13169	0.14469	33.47769	1.53319	°/год
a_x	9.80903	9.80904	0.005927	0.00039	м/с ²
a_y	0.00051	0.00051	0.004418	0.00048	м/с ²
a_z	6.98988e-5	9.97693e-5	0.004391	0.00051	м/с ²
$\Delta\varphi_1$, град	-0.45469				
$\Delta\varphi_2$, град	-0.29242				

Тут $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ - похибки визначення широти, обчислені до і після ВФ.

Таким чином, за рахунок вейвлетної фільтрації високочастотних складових шуму гіроскопів та акселерометрів вдалося зменшити похибку визначення широти майже в два рази.

Для порівняння отриманих результатів, було проведено фільтрацію високочастотних шумових складових сигналів за допомогою фільтра Калмана (ФК). Отримані результати обчислень до і після калмановської фільтрації наведено в табл.4.

Таблиця 4. Результати усереднення фільтром Калмана

	Середнє до ФК	Середнє після ФК	СКВ до ФК	СКВ після ФК	одиниці виміру
Ω_x	11.605188	11.548486	34.455609	2.497535	°/год
Ω_y	-10.127233	-10.073288	33.491656	2.528018	°/год
Ω_z	0.130684	0.131826	33.477550	2.582386	°/год
a_x	9.809032	9.768779	0.005928	0.499753	м/с ²
a_y	0.000511	0.000509	0.004418	0.000610	м/с ²
a_z	6.985569e-5	0.040323	0.004391	0.499810	м/с ²
$\Delta\varphi_1$, град	-0.451433				
$\Delta\varphi_3$, град	-0.466475				

Тут $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_3$ - похибки визначення широти, обчислені до і після усереднення фільтром Калмана.

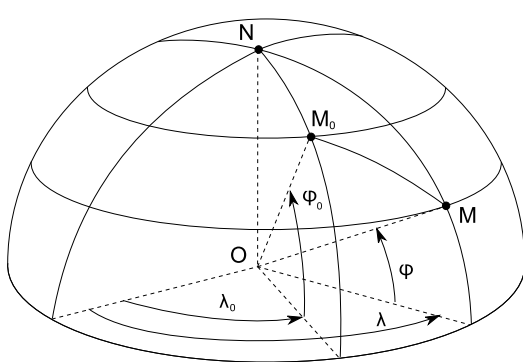
Отже, застосування ФК не покращило результат обчислення широти в порівнянні з вейвлетною фільтрацією вихідних сигналів гіроскопів і акселерометрів.

В дисертаційній роботі розроблено математичну модель похибки визначення широти, представлено чисельні оцінки похибок гіроскопів і акселерометрів в залежності від похибки визначення широти місця.

Отримані чисельні оцінки показують, що для практичної реалізації даного методу визначення широти місця потрібні гіроскопи і акселерометри навігаційного класу точності.

В дисертаційній роботі досліджено вплив вібрації основи на визначення широти місця. Встановлено, що вертикальна осьова вібрація основи практично не впливає на визначення широти, а просторова вібрація робить цей метод непрацездатним.

Далі в розділі отримано аналітичні вирази автономного визначення довготи на нерухомій основі. Положення точки на земному сфероїді визначається довготою λ , широтою φ і радіусом Землі R (рис.4). В роботі на основі системи диференціальних рівнянь геодезичних ліній отримано точний вираз для визначення довготи:



$$\lambda = \lambda_0 + \ln \left| \frac{\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right)}{\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_0}{2} + \frac{\pi}{4} \right)} \right| \cdot \operatorname{tg} A, \quad (3)$$

де λ_0, φ_0 - відомі координати реперної точки M_0 , A - азимут реперної точки.

Рис.4. Положення точки M на земному сфероїді

Поточну широту φ точки M можна виміряти за допомогою розробленого автономного методу визначення широти на нерухомій основі. Азимут A реперної точки M_0 можна визначити наземним гірокомпасом або за допомогою ІВМ у режимі аналітичного гірокомпасування.

На основі отриманої залежності (3) запропоновано та обґрунтовано *метод автономного визначення довготи*, який полягає:

- 1) у використанні відомих координат реперної точки λ_0, φ_0 ;
- 2) визначенні азимуту A реперної точки, виміряного з поточного положення;

3) обчисленні широти за виразом (1) та обчисленні довготи за виразом (3).

На рис.5 зображено графік абсолютної похибки розрахунку різниці довготи, обчисленої за формулою (3) і відомою наближеною формулою в залежності від азимута.

$$\lambda \approx \lambda_0 + \frac{2 \sin\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2}\right)}{\cos \frac{\varphi + \varphi_0}{2}} \cdot \operatorname{tg} A. \quad (4)$$

Похибка обчислення різниці довготи збільшується зі збільшенням відстані від реперної точки.

Таким чином, використання отриманої точної залежності (3) має переваги над виразом (4) при збільшенні різниці широт або відстані між поточним положенням і положенням репера.

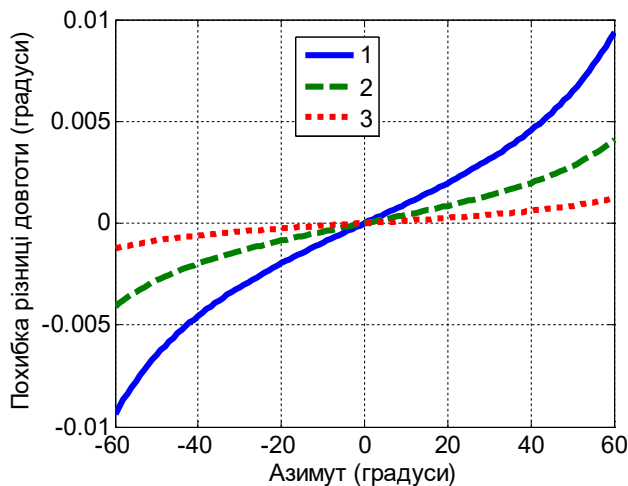


Рис.5. Залежності похибки розрахунку різниці довготи

Криві 1,2,3 розраховані для значень широти 46° , 47° і 48° відповідно при $\varphi_0 = 50^\circ$.

В третьому розділі отримано нові аналітичні вирази автономного визначення широти та довготи місця рухомих об'єктів, на основі яких запропоновано та обґрунтовано нові метод та алгоритм автономного визначення навігаційних параметрів рухомих об'єктів,

при яких використовується інформація про абсолютну кутову швидкість об'єкта. Під автономним розуміється метод, що не використовує астрономічні, супутникові навігаційні або інші системи. Розробка методу ґрунтується на використанні ІВМ.

На рис.6,а зображено положення ІВМ, який пов'язано з системою координат $oxuz$, відносно географічної системи координат $O\xi\eta\zeta$, а також кути орієнтації ψ, θ, γ об'єкта (рис.6,б).

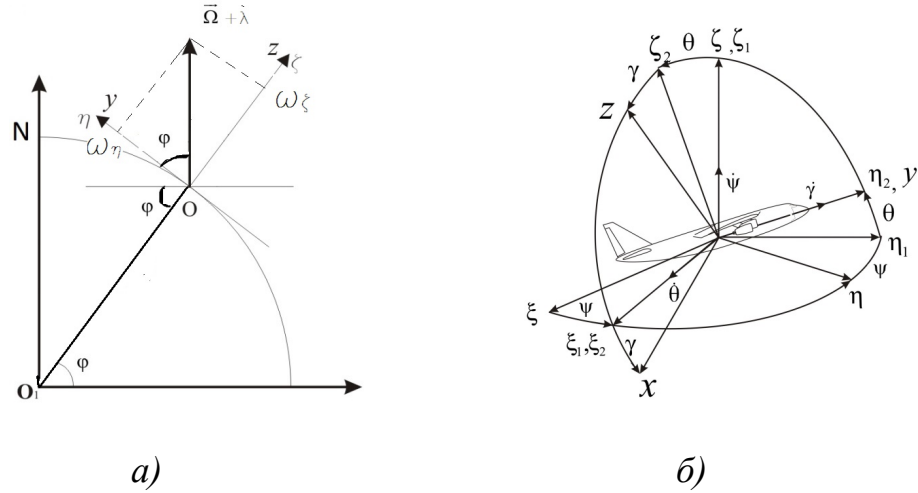


Рис.6. Положення ІВМ відносно Землі (а) та його кути орієнтації (б)

На основі відношення проєкцій кутової швидкості на вісі $O\eta$ і $O\zeta$ отримано вираз для визначення широти:

$$\varphi = \arctg \frac{c_{31}\omega_x + c_{32}\omega_y + c_{33}\omega_z}{c_{21}\omega_x + c_{22}\omega_y + c_{23}\omega_z}. \quad (5)$$

Крім того, з проєкції кутової швидкості на вісь $O\eta$ отримано вираз для визначення довготи:

$$\lambda = \lambda_0 + \int_{t_{k-1}}^{t_k} \left(\frac{c_{21}\omega_x + c_{22}\omega_y + c_{23}\omega_z}{\cos \varphi} - \Omega \right) dt, \quad (6)$$

де

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{bx} - \dot{\theta} \cos \gamma + \dot{\psi} \cos \theta \sin \gamma \\ \omega_{by} - \dot{\psi} \sin \theta - \dot{\gamma} \\ \omega_{bz} - \dot{\theta} \sin \gamma - \dot{\psi} \cos \theta \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix},$$

$\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz}$ - проєкції кутової швидкості об'єкта.

На основі отриманих виразів (5) і (6) запропоновано та обґрунтовано метод автономного визначення широти і довготи рухомого об'єкта, який полягає:

- 1) у вимірюванні проєкцій кутової швидкості об'єкта $\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz}$, кутів повороту об'єкта ψ, θ, γ та їх похідних;
- 2) усередненні та фільтрації вимірюваних сигналів;
- 3) обчисленні елементів матриці напрямних косинусів;

4) обчисленні широти та довготи за виразами (5) і (6).

В порівнянні з традиційним алгоритмом БІНС визначення широти відбувається без інтегрування показань акселерометрів, а визначення довготи потребує лише інтегрування сигналів гіроскопів. Якщо для визначення широти місця досить мати сигнали гіроскопів ІВМ, кути повороту об'єкта і його кутові швидкості, то для визначення довготи необхідно знати початкове значення довготи λ_0 .

На рис. 7 представлені графічні залежності широти (а) і довготи (б), розраховані з використанням співвідношень (5) і (6) відповідно. Швидкість руху основи приймалась 200 м/с (крива 1); 400 м/с (крива 2); 600 м/с (крива 3). Початкові координати мали значення 50° п.ш. і 30° с.д. (м. Київ).

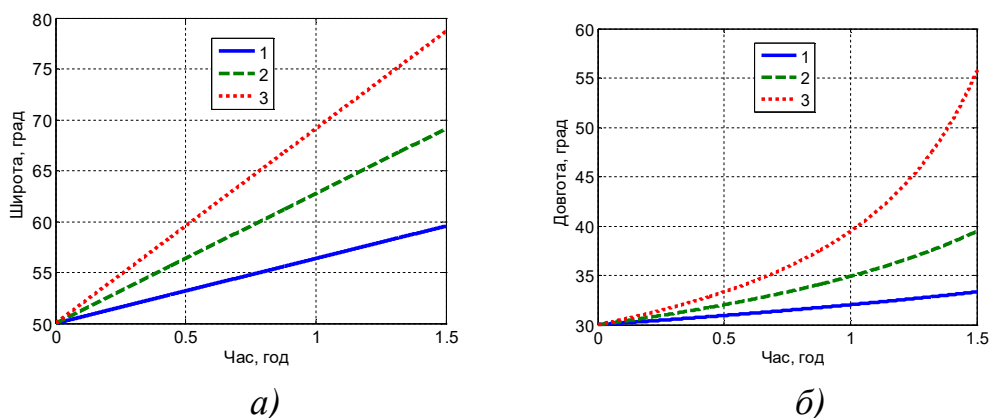


Рис. 7. Залежність широти (а) і довготи (б) від часу

В дисертаційній роботі отримано математичні моделі похибок автономного визначення широти і довготи, які дозволяють сформулювати вимоги до похибок чутливих елементів на підставі вимог до необхідної точності визначення широти і довготи.

Для перевірки методу автономного визначення широти і довготи використовувалися експериментальні дані польоту невеликого пілотованого літака неподалік від м. Орlando (США). Загальний час польоту становив трохи більше 104 хв.

На рис.8-рис.10 зображені графічні залежності широти (а) і довготи (б) від часу для трьох ділянок польоту. Крива 1 - розрахункові значення широти і довготи, крива 2 - значення широти і довготи, виміряні за допомогою приймача GNSS. З графіків на рис.8 видно, що починаючи з 5-ї секунди для широти та з 15-ї секунди для довготи, розрахункові значення коливаються біля значень, ви-

міряних приймачем GNSS. З графіків на рис.9 видно, що починаючи з 2-ї секунди для широти та з 6-ї секунди для довготи, розрахункові значення встановлюються біля значень, виміряних приймачем GNSS.

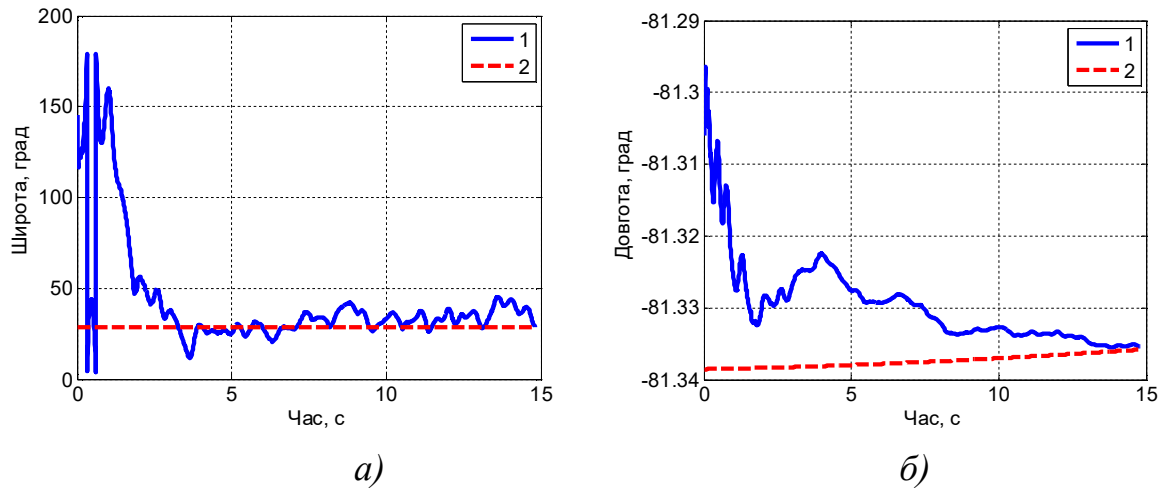


Рис.8. Графічні залежності широти (а) і довготи (б) від часу для 1-ї ділянки польоту

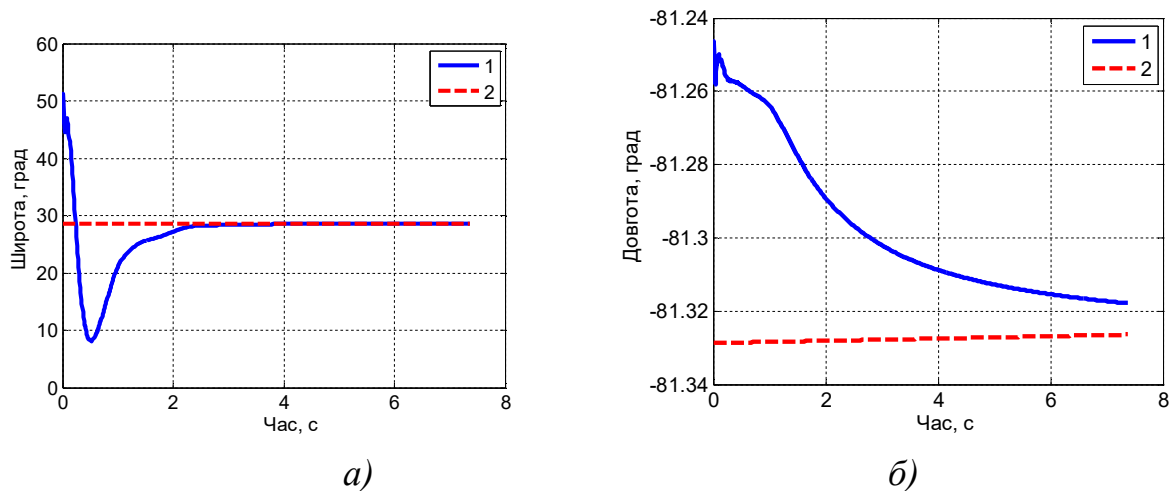


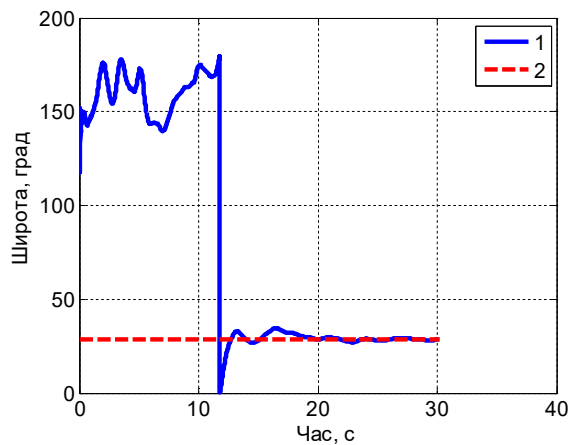
Рис.9. Графічні залежності широти (а) і довготи (б) від часу для 2-ї ділянки польоту

З графіка на рис. 10 видно, що починаючи з 12-ї секунди для широти та з 15-ї секунди для довготи, розрахункові значення встановлюються біля значень, виміряних приймачем GNSS.

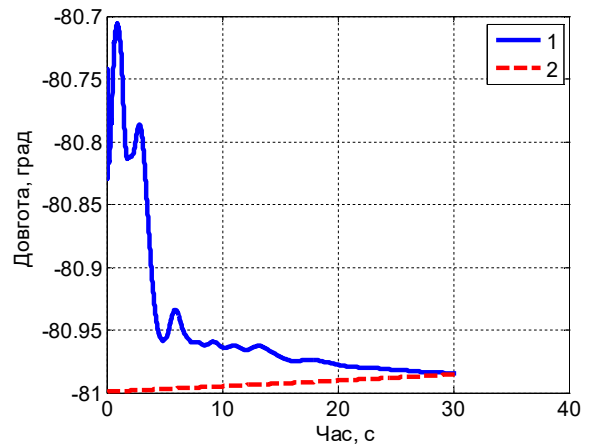
У табл.5 і табл.6 представлено чисельні результати розрахунків широти і довготи для трьох ділянок траєкторії.

Таблиця 5. Чисельні результати розрахунків широти

№ ділянки	Широта розрахункова, град	Широта по GNSS, град	Похибка широти, град
1	28.81270486	28.54416077	0.26854409
2	28.56352153	28.54789245	0.01562908
3	28.38691554	28.43957753	0.05266199



а)



б)

Рис.10. Графічні залежності широти (а) і довготи (б) від часу для 3-ї ділянки польоту

Таблиця 6. Чисельні результати розрахунків довготи

№ ділянки	Довгота розрахункова, град	Довгота по GNSS, град	Похибка довготи, град
1	-81.33529871	-81.33580903	0.000510332
2	-81.31786629	-81.3263996	0.00853331
3	-80.98452804	-80.98527892	0.00075088

Порівняння результатів розрахункових значень широти і довготи з реальними даними експериментального польоту літака підтвердили працездатність методу автономного визначення широти і довготи. При цьому похибки визначення довготи на порядок менше похибок широти.

Четвертий розділ присвячено автономному визначенню курсу і швидкості руху. Отримано повний вираз для похибки гірокомпасування для нерухомої основи:

$$\begin{aligned}
\Delta\psi_0 = & \frac{1}{c_{21}^2 + c_{22}^2} \left\{ c_{22} c_{32} \frac{\Delta g_x}{g} - c_{22} c_{12} \frac{\Delta g_z}{g} + \right. \\
& + c_{21} \left[\frac{1}{\Omega \cos \varphi} \Delta \omega_y + tg \varphi \frac{\Delta g_y}{g} + \left(\frac{\omega_y}{\Omega} \sin \varphi - c_{23} \right) \frac{1}{\cos^2 \varphi} \Delta \varphi \right] - \\
& - c_{22} c_{13} \left[\frac{1}{\Omega \cos \varphi} \Delta \omega_z + tg \varphi \frac{\Delta g_z}{g} + \left(\frac{\omega_z}{\Omega} \sin \varphi - c_{33} \right) \frac{1}{\cos^2 \varphi} \Delta \varphi \right] + \\
& \left. + c_{22} c_{33} \left[\frac{1}{\Omega \cos \varphi} \Delta \omega_x + tg \varphi \frac{\Delta g_x}{g} + \left(\frac{\omega_x}{\Omega} \sin \varphi - c_{13} \right) \frac{1}{\cos^2 \varphi} \Delta \varphi \right] \right\}.
\end{aligned} \tag{7}$$

З виразу видно, що в загальному випадку похибка гірокомпасування залежить від похибок трьох гіроскопів $\Delta\omega_i$ ($i = x, y, z$), трьох акселерометрів Δg_i ($i = x, y, z$) і похибки введення широти місця $\Delta\varphi$.

Далі розглянуто автономне визначення курсу при русі по ортодромії. На підставі теореми Клеро отримано рекурентний вираз для k -го такту вихідного сигналу курсу

$$H_k = \arcsin \left(\frac{\cos \varphi_{k-1} \sin H_{k-1}}{\cos \varphi_k} \right). \tag{8}$$

Отже, для поточного значення курсу H_k необхідно знати попередні значення курсу H_{k-1} і широти φ_{k-1} , а також поточну широту місцезнаходження об'єкта φ_k . В роботі наведено результати математичного моделювання, які підтвердили справедливості отриманої залежності (8).

В роботі отримано повний вираз для похибки визначення кута курсу:

$$\begin{aligned}
\Delta H_k = & \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \varphi_k - \cos^2 \varphi_{k-1} \cdot \sin^2 H_{k-1}}} \left(-\sin H_{k-1} \cdot \sin \varphi_{k-1} \cdot \Delta \varphi_{k-1} + \right. \\
& \left. + \frac{\cos \varphi_{k-1}}{\cos \varphi_k} \sin H_{k-1} \cdot \sin \varphi_k \cdot \Delta \varphi_k + \cos \varphi_{k-1} \cdot \cos H_{k-1} \cdot \Delta \varphi_{k-1} \right).
\end{aligned} \tag{9}$$

Таким чином, похибка визначення кута курсу залежить від поточних та попередніх похибок визначення широти та попередніх похибок курсу.

Доведена теорема про суму квадратів швидкостей зміни широти і довготи при русі по локсодромії:

$$\dot{\varphi}^2 + \dot{\lambda}^2 \cdot \cos^2 \varphi = \left(\frac{v}{R} \right)^2. \quad (10)$$

Отже, сума квадратів швидкостей зміни широти і довготи, помноженої на квадрат косинуса широти, дорівнює квадрату відношення лінійної швидкості об'єкта до радіусу Землі.

Використовуючи цю теорему, отримано вираз для визначення швидкості руху:

$$v = R \sqrt{\dot{\varphi}^2 + (\dot{\lambda} \cdot \cos \varphi)^2}. \quad (11)$$

Отриманий вираз дозволяє визначити швидкість рухомого об'єкта, використовуючи інформацію про квадрати швидкостей зміни широти і довготи.

Для перевірки методу автономного визначення швидкості також використовувалися експериментальні дані польоту невеликого пілотованого літака про широту, довготу, виміряні приймачем GNSS, а також інформація про горизонтальну складову швидкості літака і поточний час.

На рис. 11 зображені графічні залежності швидкості від часу для трьох (а, б, в) ділянок польоту. Крива 1 - розрахункові значення швидкості, крива 2 - експериментальні значення швидкості.

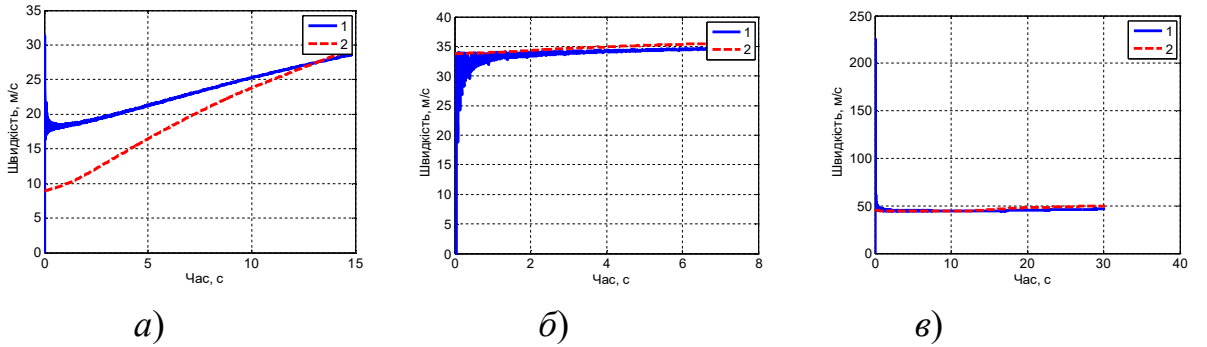


Рис. 11. Залежності швидкості від часу для трьох ділянок польоту

З графіків видно, що починаючи з 13-ї секунди для 1-ї ділянки, з 2-ї секунди для 2-ї ділянки та з 1-ї секунди для 3-ї ділянки розрахункові значення швидкості збігаються з експериментальними значеннями швидкості, що свідчить про справедливість отриманого виразу (11) для визначення швидкості руху.

Отримано вираз похибки визначення швидкості:

$$\Delta v = \frac{R^2}{v} \left(\dot{\varphi} \cdot \Delta \dot{\varphi} + \dot{\lambda} \cdot \cos \varphi \cdot \Delta \dot{\lambda} - \dot{\lambda} \cdot \sin \varphi \cdot \Delta \varphi \right) + \Delta R \cdot \frac{v}{R}. \quad (12)$$

Відповідно до виразу (12), похибка визначення швидкості залежить від похибок визначення швидкостей зміни широти $\Delta\phi$ і довготи $\Delta\lambda$, від похибки визначення широти широти, а також від похибки визначення радіусу Землі.

П'ятий розділ дисертаційної роботи присвячено обчислювальним алгоритмам орієнтації, які перетворюють вихідні сигнали гіроскопів в кути орієнтації рухомого об'єкта. В роботі отримано двокрокові розширені обчислювальні алгоритми у випадку, коли вихідними сигналами гіроскопів є квазікоординати $\Delta\vec{\theta}_1, \Delta\vec{\theta}_2$:

$$\vec{\Phi}(h) = \Delta\vec{\theta}_1 + \Delta\vec{\theta}_2 + \frac{2}{3}\Delta\vec{\theta}_1 \times \Delta\vec{\theta}_2 + \frac{1}{60}(7\Delta\vec{\theta}_1 + 3\Delta\vec{\theta}_2) \times (\Delta\vec{\theta}_1 \times \Delta\vec{\theta}_2), \quad (13)$$

$$\vec{\Phi}(h) = \Delta\vec{\theta}_1 + \Delta\vec{\theta}_2 + \frac{2}{3}\Delta\vec{\theta}_1 \times \Delta\vec{\theta}_2 + \frac{13}{2}(\Delta\vec{\theta}_2 - \Delta\vec{\theta}_1) \times (\Delta\vec{\theta}_1 \times \Delta\vec{\theta}_2). \quad (14)$$

Крім того, в роботі отримано обчислювальні алгоритми у випадку, коли вихідними сигналами гіроскопів є кутові швидкості $\vec{\omega}$ (табл.7).

Таблиця 7. Обчислювальні алгоритми для кутових швидкостей

Число кроків	Алгоритми $\vec{\Phi}(h)$
1	$\dot{\vec{\Phi}}(h) = \frac{1}{2}\vec{\omega}_1 + \frac{1}{2}\vec{\omega}_2 + (\vec{\omega}_1 \times \vec{\omega}_2)\frac{h}{12}$
2	$\dot{\vec{\Phi}}(h) = \frac{1}{6}\vec{\omega}_1 + \frac{2}{3}\vec{\omega}_2 + \frac{1}{6}\vec{\omega}_3 + \left(\frac{1}{15}\vec{\omega}_1 \times \vec{\omega}_2 + \frac{1}{60}\vec{\omega}_1 \times \vec{\omega}_3 + \frac{1}{15}\vec{\omega}_2 \times \vec{\omega}_3 \right)h$
3	$\begin{aligned} \dot{\vec{\Phi}}(h) = & \frac{1}{8}\vec{\omega}_1 + \frac{3}{8}\vec{\omega}_2 + \frac{3}{8}\vec{\omega}_3 + \frac{1}{8}\vec{\omega}_4 + \\ & + \frac{39h}{2240}\vec{\omega}_1 \times \vec{\omega}_2 + \frac{3h}{140}\vec{\omega}_1 \times \vec{\omega}_3 + \frac{47h}{6720}\vec{\omega}_1 \times \vec{\omega}_4 + \\ & + \frac{243h}{2240}\vec{\omega}_2 \times \vec{\omega}_3 + \frac{3h}{140}\vec{\omega}_2 \times \vec{\omega}_4 + \frac{39h}{2240}\vec{\omega}_3 \times \vec{\omega}_4. \end{aligned}$

На рис.12 наведено графіки залежності дрейфів похибок алгоритмів від кроку опитування для квазікоординат (а) і кутових швидкостей (б).

Із графіків видно, що застосування розширеного алгоритму орієнтації, що враховує третій доданок в рівнянні Борца, не завжди призводить до підвищення

точності в порівнянні з алгоритмами, що використовують спрощену форму. Похибка обчислювальних алгоритмів орієнтації, що використовують значення вихідних сигналів датчиків кутових швидкостей, зменшується із зростанням кількості кроків опитування.

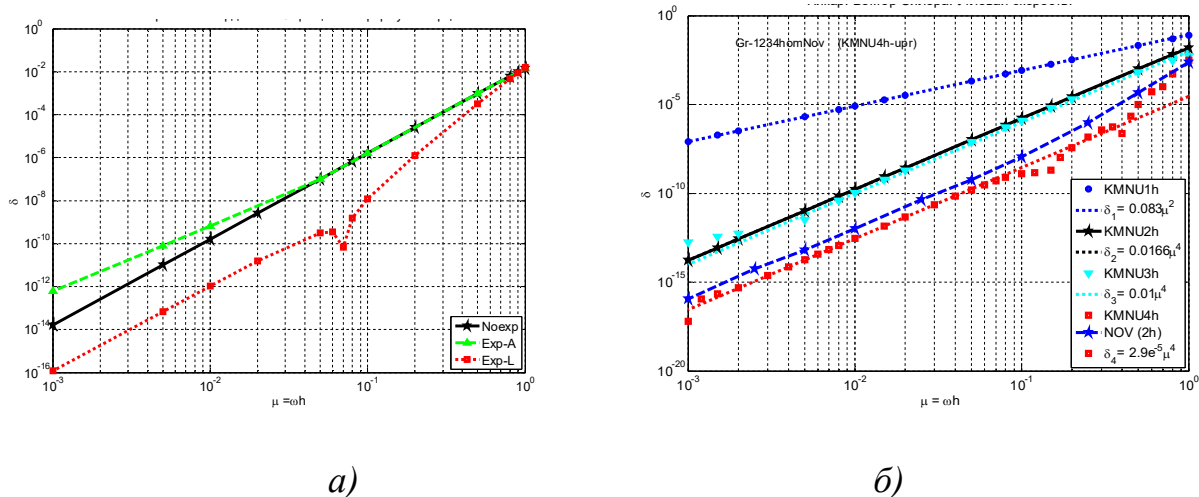


Рис.12. Залежності дрейфів похибок алгоритмів від кроку опитування для квазікоординат (а) і кутових швидкостей (б)

Шостий розділ роботи присвячено просторовому способу калібрування, при якому ІВМ повертається навколо вектору кінцевого повороту.

Зазвичай при калібруванні блоку акселерометрів методом тестових поворотів вимірюють вихідні сигнали, послідовно повертаючи блок навколо осі ox , а потім, переставляючи блок акселерометрів на ОДГ так, щоб поворот здійснювався навколо осі oy , і нарешті, повторюючи процедуру, щоб поворот здійснювався навколо осі oz . Насправді, поворот об'єкту відбувається на деякий кінцевий кут (поворот), який є результатом поворотів навколо двох або трьох ортогональних осей. В роботі розглянуто спочатку калібрування акселерометрів, при якому одночасно повертають ІВМ на кути α, β, γ навколо трьох осей $Oxuz$ з певним кроком повороту. Після кожного повороту вимірюються вихідні сигнали блоку акселерометрів та отримується матричне рівняння калібрування. Вирішуючи рівняння калібрування вдається отримати оцінки зсувів нулів, масштабних коефіцієнтів і коефіцієнтів перехресного зв'язку.

Також в роботі запропоновано просторове калібрування блоку гіроскопів, при якому обертання відбувається навколо декількох осей одночасно. На відміну від просторового калібрування блоку акселерометрів, при калібруванні бло-

ку гіроскопів має бути забезпечено, щоб $\text{rank } \omega_{n \times 4} = \text{rank } [\omega_{n \times 4}, U_{\omega 3}]$, де $\omega_{n \times 4}$ - матриця кутових швидкостей, а $U_{\omega 3}$ - вектор-стовбець вихідних сигналів гіроскопів. Ця умова може бути отримана, наприклад, при нелінійній залежності стовпців матриці $\omega_{n \times 4}$.

Таким чином, отримана умова вирішення рівняння калібрування блоку гіроскопів: щоб мало місце рішення рівняння калібрування, необхідно забезпечити рівність рангу основної матриці рівняння калібрування її порядку.

На відміну від традиційних методів калібрування, при просторовому способі калібрування вдається по-перше, приблизити умови випробувань до реальних умов, а по-друге, зменшити час випробувань втричі.

Оскільки при вирішенні проблеми автономного визначення навігаційних параметрів використовується ІВМ, то необхідно забезпечити його працездатність методами контролю і діагностики.

Сьомий розділ роботи присвячено скалярному методу контролю і діагностики ІВМ. Для цього використовується нормоване рівняння калібрування акселерометрів:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(\tilde{a}_x^2 + \tilde{a}_y^2 + \tilde{a}_z^2 - 1) = & -b_{ax}\bar{g}_x - b_{ay}\bar{g}_y - b_{az}\bar{g}_z + \\ & + e_{ax}\bar{g}_x^2 + e_{ay}\bar{g}_y^2 + e_{az}\bar{g}_z^2 + \delta_{a1}\bar{g}_x\bar{g}_y + \delta_{a2}\bar{g}_x\bar{g}_z + \delta_{a3}\bar{g}_y\bar{g}_z, \end{aligned} \quad (16)$$

де $\tilde{a}_x, \tilde{a}_y, \tilde{a}_z$ - нормовані вихідні сигнали акселерометрів; b_{ax}, b_{ay}, b_{az} - нормовані нульові сигнали акселерометрів; $\bar{g}_x, \bar{g}_y, \bar{g}_z$ - нормовані проєкції прискорення сили тяжіння; e_{ax}, e_{ay}, e_{az} - нормовані відносні похибки масштабних коефіцієнтів акселерометрів; $\delta_{a1}, \delta_{a2}, \delta_{a3}$ - різниці кутів невивиставлення для акселерометрів.

На підставі основного рівняння методу скалярною калібрування (16) побудовано алгоритм контролю або виявлення відмови блоку акселерометрів. Для цього на k -ому кроці квантування можна сформулювати наступний предикат для моменту часу t_k :

$$F_0(t_k) = \Lambda_0 \left\{ \frac{1}{2}(\tilde{a}_x^2 + \tilde{a}_y^2 + \tilde{a}_z^2 - 1) \leq \lambda_0 \right\} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}. \quad (17)$$

В правій частині предикату (17) значення «1» - означає працездатний стан блоку акселерометрів, значення «0» - його відмова,

λ_0 - граничне значення функції $\frac{1}{2}(\tilde{a}_x^2 + \tilde{a}_y^2 + \tilde{a}_z^2 - 1)$.

Якщо скалярне значення суми нормованих вихідних сигналів блоку акселерометрів, а точніше значення функції $\tilde{a}_x^2 + \tilde{a}_y^2 + \tilde{a}_z^2 - 1$ не перевищує величини $2\lambda_0$, значить, блок акселерометрів знаходиться в працездатному стані. Якщо перевищує, то сталася відмова.

Після розв'язання задачі контролю - виявлення відмови всього блоку акселерометрів необхідно діагностувати місце відмови і з'ясувати його причину. Для цього необхідно на підставі рівняння (16) скласти і розв'язати систему рівнянь для різних положень блоку акселерометрів.

На рис.13 зображена блок-схема алгоритму контролю і діагностики блоку акселерометрів IBM. Тут цифрами 1,2,3 в кружках позначені відмови акселерометрів, викликані невідповідністю нульового сигналу, цифрами 4,5,6 - відмови акселерометрів, викликані невідповідністю похибок масштабних коефіцієнтів, а цифрами 7,8,9 - відмови акселерометрів, викликані невідповідністю кутів невиснавлення акселерометрів.

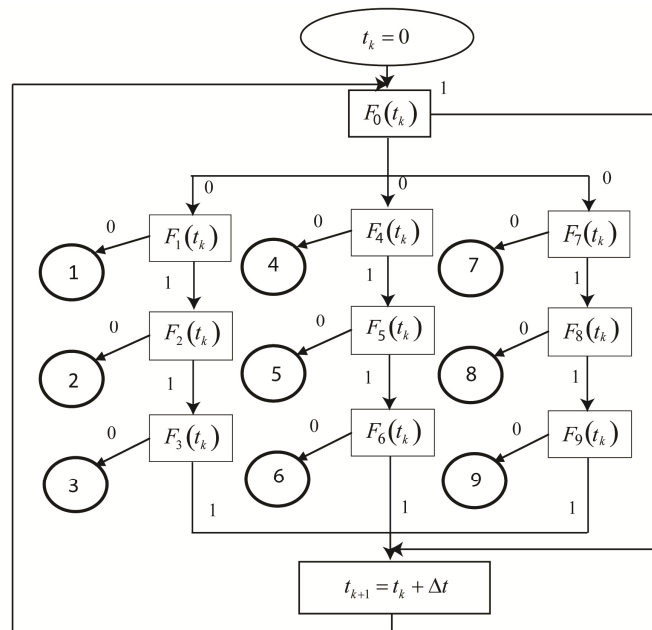


Рис.13. Блок-схема алгоритму контролю і діагностики блоку акселерометрів IBM

Аналогічна схема може бути побудована для блоку гіроскопів IBM.

Таким чином, запропоновано та обґрунтовано скалярний метод контролю і діагностики блоку гіроскопів і акселерометрів, на основі скалярного способу калібрування.

Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список публікацій здобувача за темою дисертації, відомості про апробацію результатів дисертації та лістинги програм моделювання.

ВИСНОВКИ

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є вирішення важливої науково-технічної проблеми створення нових способів та забезпечення прийнятної точності автономного визначення навігаційних параметрів нерухомих та рухомих об'єктів із застосуванням чутливих елементів середньої точності в умовах зовнішніх завад роботі радіотехнічних навігаційних систем.

1. На основі проведеного інформаційно-аналітичного огляду встановлено, що похибки чутливих елементів інерціальних навігаційних систем зумовлюють збільшення похибок визначення місцезнаходження з часом внаслідок необхідності інтегрування їх вихідних сигналів, коригування їх показань за супутниковими чи іншими системами не забезпечує необхідної вимоги автономності визначення місцезнаходження та навігаційних параметрів, а використання високоточних чутливих елементів є дороговартісним і не завжди технічно прийнятним для багатьох рухомих об'єктів. Показано, що забезпечення прийнятної точності визначення навігаційних параметрів системами на основі чутливих елементів середньої точності потребує розробки нових науково - обґрунтованих методів та алгоритмів автономного визначення початкових координат для нерухомих об'єктів, а для рухомих – методів та алгоритмів автономного визначення місцезнаходження, що не містять стандартних процедур дворазового інтегрування показань акселерометрів.

2. Вперше отримано аналітичні вирази для автономного визначення широти та довготи місця нерухомого об'єкта шляхом використання значень проєкцій кутової швидкості обертання Землі та проєкцій прискорення сили тяжіння, на основі яких розроблено та обґрунтовано нові метод та алгоритм автономного визначення місцезнаходження, зокрема:

- підтверджено результатами комп'ютерного моделювання, що постійний нахил ІВМ відносно площини горизонту та відхилення ІВМ в азимуті не впливають на визначення широти місця;
- експериментально підтверджено працездатність розробленого методу автономного визначення широти ІВМ на основі кільцевих лазерних гіроскопів та навігаційних акселерометрів (похибка становила від $0^{\circ}09'14''$ до $0^{\circ}16'30''$) та ІВМ на основі мікромеханічних гіроскопів та акселерометрів (похибка становила від $0,25^{\circ}$ до $1,5^{\circ}$);
- показано, що для визначення початкової довготи місця необхідно мати інформацію про широту місця, координати реперної точки і її азимут;
- розроблено математичну модель похибки визначення широти місця нерухомого об'єкта, аналіз якої показав, що основними причинами виникнення похибки визначення широти місця є похибки гіроскопів і акселерометрів, встановлено вимоги до похибок гіроскопів (дрейфом не більше $0,0024$ град/год) та акселерометрів (зміщення нуля не більше $1,5 \cdot 10^{-4}g$) для практичної реалізації розробленого методу визначення широти місця з похибкою не більше 1 кут. хв. Розроблено модель похибки визначення довготи місця нерухомого об'єкта, встановлено, що основними причинами її виникнення є похибки визначення широти і азимута, встановлено вимоги до похибок визначення азимуту реперної точки (не більше 1 кут.хв) і широти поточного положення (не більше 3 кут.хв.) для забезпечення прийнятної точності визначення довготи (похибка не перевищує $7,4$ кут. хв.);
- встановлено, що необхідно враховувати поправку $\Delta\varphi_i$, викликану відмінню геодезичної широти від геоцентричної широти та різницею між моделями Землі для еліпсоїда Красовського ($i=1$) та референц-еліпсоїда WGS-84 ($i=2$).

3. Отримано нові аналітичні вирази автономного визначення широти та довготи місця рухомого об'єкта, на основі яких розроблено і обґрунтовано нові метод та алгоритм автономного визначення навігаційних параметрів рухомих об'єктів, зокрема:

- обґрунтовано, що обчислення широти не потребує інтегрування показань акселерометрів і гіроскопів, а обчислення довготи забезпечується лише одноразовим інтегруванням показань гіроскопів;
- підтверджено комп'ютерним моделюванням, що отримані нові вирази автономного визначення широти та довготи місця на рухомій основі забезпечують визначення широти і довготи об'єкта при його русі з різною швидкістю;
- отримано аналітичні вирази для похибок автономного визначення широти і довготи, які залежать від похибок гіроскопів, похибок визначення кутів орієнтації об'єкта і похибок кутових швидкостей, встановлено, що похибка автономного визначення довготи на два порядки менша похибки автономного визначення широти;
- підтверджено працездатність розробленого методу на основі порівняльного аналізу розрахункових значень широти і довготи з реальними даними експериментального польоту літака, в результаті якого встановлено, що максимальні похибки визначення широти за розробленим методом не перевищують 0,3 град, а мінімальні похибки – не перевищують 0,02 град., максимальні похибки визначення довготи не перевищують 0,009 град, а мінімальні похибки – не перевищують 0,0005 град.

4. На основі теореми Клеро вперше отримано рекурентний вираз для визначення поточного курсу об'єкта при його русі по ортодромії в залежності від попередніх значень курсу і широти та поточного значення широти місцезнаходження об'єкта. Розроблено математичну модель похибки визначення курсу рухомого об'єкта, яка залежить від поточних та попередніх похибок визначення широти та попередніх похибок курсу. Встановлено, що похибка розрахованого значення курсу за отриманим рекурентним виразом не перевищує значень $2,5 \cdot 10^{-10}$ град, що свідчить про її мале значення для розглянутих випадків руху. Вперше отримана та доведена теорема про суму квадратів швидкостей зміни широти і довготи, якщо рух об'єкта відбувається по локсодромії, на основі якої отримано вираз для визначення швидкості рухомого об'єкта, який використовує інформацію про поточні швидкості зміни широти та довготи.

5. Вперше розроблено розширені обчислювальні алгоритми для квазікоординат, які враховують третій доданок в формулі Борца, на основі комп'ютерного моделювання встановлено умови його застосування для підвищення точності порівняно з алгоритмами, що використовують спрощену форму. Розроблено нові обчислювальні алгоритми орієнтації, що використовують значення вихідних сигналів датчиків кутових швидкостей, в результаті дослідження яких встановлено, що порядок точності розроблених алгоритмів може залишатись однаковим (четвертим) для дво- і трикрокових алгоритмів, а похибка алгоритмів зменшується із зростанням числа кроку опитування з 10^{-5} для однокрокового до 10^{-10} для дво- і трикрокових алгоритмів.

6. Обґрунтовано та підтверджено результатами натурного експерименту метод просторового калібрування блоку акселерометрів і блоку гіроскопів, який полягає в повороті ІВМ на кінцевий кут або повороті ІВМ навколо вектору кінцевого повороту та в одночасному повороті на кути α, β, γ навколо трьох осей с певним кроком повороту. Встановлено, що запропонований метод забезпечує збільшення продуктивності праці або зменшення часу випробувань у три рази та наближення умов випробувань до реальних. Вперше отримано аналітично та встановлено умову просторового калібрування блоку гіроскопів по забезпеченню рівності рангу основної матриці рівняння калібрування її порядку або числу стовпців для повного рішення рівняння калібрування.

7. Запропоновано та обґрунтовано скалярний метод контролю і діагностики блоку гіроскопів і акселерометрів, що входять до складу безплатформової інерціальної навігаційної системи, на основі скалярного способу калібрування.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджено на етапі лабораторно-дослідних випробувань на Державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» імені М.К. Янгеля» (м. Дніпро), ТОВ «Гіротех» (м. Київ), АТ «Елміз» (м. Київ). Результати досліджень впроваджено в навчальну дисципліну «Додаткові розділи теорії чутливих елементів» при підготовці магістрів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на кафедрі приладів і систем навігації та орієнтації приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського (м.Київ).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Avrutov V. On Scalar Calibration of an Inertial Instrument Cluster//*Innovation and Technologies News*, 2011, No. 2(11), pp.22-30. (Видання індексується в наукометричній базі Google Scholar). <http://www.innovationsline.com./pdf/2011.Nr.2.pdf>

2. V. Avrutov. Scalar Method of Fault Diagnosis of Inertial Measurement Unit// *Advances in Aerospace Engineering* /Hindawi Publishing Corporation. – 2015. – Volume 2015, Article ID 264564, 10 pages. (Видання індексується в наукометричних базах Ei Compendex, DOAJ, Google Scholar). DOI: 10.1155/2015/264564

3. Avrutov V. Scalar Diagnostics of the Inertial Measurement Unit/ *I.J. Intelligent Systems and Applications*, 2015, vol.11, pp.1-9. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, Microsoft Academic Search, CrossRef, Baidu Wenku, IndexCopernicus, IET Inspec, EBSCO, JournalSeek, ULRICH's Periodicals Directory, WordCat, Scirus, Academic Journals Database, Stanford University Libraries, etc.). DOI:10.5815/ijisa.2015.11.01

4. V.V. Avrutov, A.N. Sapegin, Z.S. Stefanishin, V.V. Tsisarzh. Calibration of an Inertial Measurement Unit // *International Applied Mechanics*, Vol.53, No.2, March, 2017. – pp. 228-236. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1007/s10778-017-0808-4

Здобувачем виконано порівняльний аналіз різних методів калібрування інерціально-вимірювальних модулів та запропонована ідея просторового калібрування.

5. Avrutov V. Spatial Calibration for the Inertial Measurement Unit // *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*, 2017, vol.7, No.1, pp. 1-11. **(Входить до SCOPUS)**. DOI:10.2174/2210327907666170307121825

6. V.V. Avrutov. Autonomous Determination of Initial Latitude with an Inertial Measuring Unit // *International Applied Mechanics*, Vol.54, No.5, September, 2018. – pp. 594-599. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1007/s10778-018-0913-z

7. Аврутов В.В. Особенности гироскопа, построенного на ДНГ - измерителе угловой скорости / В.В. Аврутов, А.В. Збруцкий, О.И. Нестеренко // *Механика гироскопических систем*. – 1994. – вып.13. – с. 85-88. (Видання індексується в наукометричній базі Index Copernicus).

Здобувачем запропоновано розглянути такі особливості гірокомпаса, як вплив постійної часу та похибки від динамічного налаштування гіроскопу.

8. Аврутов В.В. Математическая модель малогабаритного корректируемого гироскопа с динамически настраиваемым гироскопом / В.В. Аврутов, О.И. Нестеренко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 1995. – Вип. 24. – С. 24-33. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ eLIBRARY.ru, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Здобувачем розроблена математична модель гірокомпаса, побудованого на гіроскопі, що динамічно налаштовується.

9. Аврутов В.В. Випробування та калібрування мікромеханічних акселерометрів / В.В. Аврутов, П.М. Бондар, В.В. Мелешко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2008. – Вип. 36. – С. 12-19. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ eLIBRARY.ru, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Здобувачем детально розглянуто такий метод випробування та калібрування мікромеханічних акселерометрів, як метод тестових поворотів.

10. Аврутов В.В. О скалярной калибровке блока гироскопов и акселерометров//Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Приладобудування. – 2010. – № 40, С. 10–17. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ eLIBRARY.ru, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

11. Аврутов В.В. Влияние акустического шума на переходную характеристику акселерометра / В.В. Аврутов, Д.В. Аврутова, П.М. Бондарь, Ю.Ф. Лазарев // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 43. – С. 175-180. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ eLIBRARY.ru, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Здобувачем проведено математичне моделювання впливу акустичного шуму на вихідний сигнал акселерометрів.

12. Аврутов В.В. Влияние погрешности поворота стенда на точность калибровки блока гироскопов и акселерометров / В.В. Аврутов, Т.Ю. Мазепа // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 43. – С. 5-10. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ eLIBRARY.ru, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Здобувачем запропоновано розглянути вплив похибки повороту випробувального стенду на точність калібрування блоку гіроскопів та акселерометрів.

13. Аврутов В.В. Исследование инерциального измерительного модуля с USB-портом / В.В. Аврутов, С.В. Царенко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 24-28. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ eLIBRARY.ru, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Здобувачем обґрунтована необхідність використання USB-порта для з'єднання інерціально-вимірювального модуля з комп'ютером.

14. Аврутов В.В. Определение угловой скорости поворота объекта с помощью электрического контура// Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2014. – Вип. 47 (1). – С. 28-32. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ eLIBRARY.ru, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

15. Аврутов В.В. Скалярный метод контроля и диагностики инерциально-измерительного модуля / В.В. Аврутов, С.В. Головач // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2014. – Вип. 48 (2). – С. 14-20. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ eLIBRARY.ru, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Здобувачем запропоновано використання скалярного методу калібрування для контролю та діагностування інерціально-вимірювальних модулів.

16. Аврутов В.В. Виставка інерціальної навігаційної системи з використанням ПД-регулятора/ В.В. Аврутов, З.С. Стефанишин// Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2015, №5. – с. 89-96. (Видання індексується в наукометричних базах DOAJ, EBSCO, WorldCat, J-Gate, Google Scholar, OpenAIRE, Ulrich's periods Directory, BASE, Miar, WCOSJ).

Здобувачем запропоновано використання ПД-регулятору для виставлення інерціальної навігаційної системи.

17. Аврутов В.В. Метод калібрування і корекції вихідних сигналів тривісного акселерометра/ В.В. Аврутов, С.В. Головач, О.М. Сапегін, М.Ю. Хутко// Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016, №1. – с. 92-98. (Видання індексується в наукометричних базах DOAJ, EBSCO, WorldCat, J-Gate, Google Scholar, OpenAIRE, Ulrich's periods Directory, BASE, Miar, WCOSJ).

Здобувачем обґрунтовано новий метод калібрування тривісного акселерометра, при якому використовується математичний апарат кватерніонів.

18. Аврутов В.В. Начальная выставка курсовертикали/ В.В. Аврутов, Д.В. Бугаев, В.В. Мелешко// Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2018, №1. (117) – с. 38-44. (Видання індексується в наукометричних базах DOAJ, EBSCO, WorldCat, J-Gate, Google Scholar, OpenAIRE, Ulrich's periods Directory, BASE, Miar, WCOSJ).

Здобувачем отримано повний вираз похибки визначення курсу під час початкового виставлення курсовертикалі.

19. Аврутов В.В. Обеспечение требуемого теплового режима интегрированной бесплатформенной инерциальной навигационной системы/ В.В. Аврутов, С.А. Давыденко, Е.В. Матвиенко, В. Л. Тихонов // Вісник Інженерної Академії України. – 2019, №1. – с. 99-106. (Видання індексується в наукометричній базі Google Scholar).

Здобувачем виконано порівняльний аналіз різних методів забезпечення теплового режиму інерціально-вимірювальних модулів.

20. Мироненко П.С. Комплекс спеціалізованого стендового обладнання для контролю характеристик низькочастотних акселерометрів / П.С. Мироненко, О.М. Павловський, В.В. Аврутов // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2019. – Вип. 57 (1). – С. 14-19. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ eLIBRARY.ru, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Здобувачем запропоновано схематичний варіант комплексу стендового обладнання для контролю характеристик низькочастотних акселерометрів.

21. Аврутов В.В. Температурне калібрування мікромеханічних гіроскопів з застосуванням штучних нейронних мереж/ В.В. Аврутов, Д.В. Бугайов, В.М. Шелевер // Вісник Інженерної Академії України. – 2019, № 3. – с. 134-144. (Видання індексується в наукометричній базі Google Scholar).

Здобувачем зроблений порівняльний аналіз різних методів температурного калібрування інерціально-вимірювальних модулів та запропоновано застосування для цього штучних нейронних мереж.

22. Аврутов В.В. Визначення початкових значень координат місцезнаходження інерціальними методами // Інформаційні системи, механіка та керуван-

ня. – 2019, № 20. – с. 40-47. (Видання індексується в наукометричній базі Index Copernicus).

23. Патент України на корисну модель № 123355, МПК G01C 19/00. Спосіб визначення широти місця; заявник та власник Аврутов В.В.; заявл. 31.08.2017 u2017 08762; опубл. 26.02.2018, бюл. №4.

24. Патент України на корисну модель № 140969, МПК G01C 19/00. Спосіб автономного визначення широти і довготи рухомого об'єкта; заявник та власник Аврутов В.В.; заявл. 23.10.2019 u2019 10549; опубл. 10.03.2020, бюл. №5.

25. Vadym Avrutow, Sergiy Golovach, Tetiana Mazepa. On scalar calibration of an inertial measurement unit / Proceedings of the 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, State Research Center of the Russian Federation – Concern Central Scientific and Research Institute Elektropribor JSC, 28 - 30 May, 2012. – pp. 117-121. **(Входить до SCOPUS)**.

Здобувачем запропоновано модифікацію скалярного методу калібрування інерціально-вимірювальних модулів при якій відомими є вихідні сигнали, а шуканими є параметри ІВМ.

26. Vadym Avrutow, Igor Shturma. Inertial Measurement Unit with USB-port / Proceedings of the 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, State Research Center of the Russian Federation – Concern Central Scientific and Research Institute Elektropribor JSC, 28 - 30 May, 2012. – pp. 194-195. **(Входить до SCOPUS)**.

Здобувачем запропонована ідея використання USB-порта для з'єднання інерціально-вимірювального модуля з випробувальним обладнанням.

27. Avrutow V. Wire-Electric Gyroscope // Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. November 15-21, 2013 - San-Diego, CA – paper No. IMECE2013-63287. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1115/IMECE2013-63287

28. V.V. Avrutow, P.M. Aksonenko, P. Henaff, L. Ciarletta. 3D-Calibration of the IMU/ Proceedings of the 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – pp. 374-379. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/ELNANO.2017.7939782

Здобувачем запропонована ідея просторового калібрування інерціально-вимірювального модуля, для чого треба повертати його навколо осі кінцевого повороту.

29. V.V. Avrutov, P.M. Aksonenko, N.I. Bouraou, P. Henaff, L. Ciarletta. Expanded Calibration of the MEMS Inertial Sensors / Proceedings of the 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – pp. 675-679. **(Входить до SCOPUS)**. DOI:10.1109/UKRCON.2017.8100328

Здобувачем розроблений метод розширеного калібрування інерціально-вимірювального модуля. Для розв'язання рівняння калібрування блоку гіроскопів, необхідно забезпечити рівність рангу основної матриці порядку базової матриці.

30. V.V. Avrutov, O.I. Nesterenko. 3D-Calibration of an Inertial Measurement Unit / Proceedings of the 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, State Research Center of the Russian Federation – Concern Central Scientific and Research Institute Elektropribor JSC, 29 - 31 May, 2017. – pp. 318-323. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/ELNANO.2017.7939782

Здобувачем теоретично обґрунтована ідея просторового калібрування інерціально-вимірювального модуля.

31. V.V. Avrutov, N.I. Bouraou, S.L. Lakoza, O.M. Pavlovskiy, P. Henaff, L. Ciarletta, P.M. Aksonenko. NEMS Gyroscope / Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). – pp. 409-413. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/ICE.2017.8279912

Здобувачем запропонована принципова ідея та схематичне рішення побудови нано-гіроскопа.

32. V.V. Avrutov, M.D. Geraimchuk, Xing Xiangming. 3D-Calibration for IMU of the Strapdown Inertial Navigation Systems / Proceedings of the MATEC Web of Conferences **114**, 01013 (2017). – pp.1-7. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1051/mateconf/20171140101 2MAE 2017

Здобувачем запропоновано використання алгебри кватерніонів для просторового калібрування інерціально-вимірювального модуля безплатформової інерціально-навігаційної системи.

33. Avrutov V.V., Buhaiov D.V., Meleshko V.V. “Gyrocompassing Mode of the Attitude and Heading Reference System”. Proceedings of the IEEE/APUAVD-2017,

October 17-19, 2017, Kiev, Ukraine, pp.134-138. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/APUAVD.2017.8308793

Здобувачем отримано повний вираз похибки режиму гірокомпасування безплатформової курсовертикалі.

34. Aksonenko P.M., Avrutov V.V., Lazarev Yu.F., Henaff P., Ciarletta L. "Overclocking Algorithms for SINS". Proceedings of the IEEE/APUAVD-2017, October 17-19, 2017, Kiev, Ukraine, pp.125-129. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/APUAVD.2017.8308791

Здобувачем виконано інформаційно-аналітичний огляд проблеми обчислювальних методів БІНС.

35. Xing Xiangming, Avrutov V.V., Meleshko V.V. "Gyrocompassing Mode of the Strapdown Inertial Navigation System". Proceedings of the IEEE/ITNEC-2017, December 15-17, Chengdu, China, pp. 363-368. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/ITNEC.2017.8284753

Здобувачем детально розглянуто режим гірокомпасування та визначено повний вираз похибки цього режиму безплатформової інерціально-навігаційної системи.

36. V.V. Avrutov, S.V. Golovach, V.V. Tsisarzh. Strapdown Gyro Latitude Finder/ Proceedings of the 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – pp. 511-514. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477485

Здобувачем теоретично обґрунтована ідея нового методу визначення широти місця для нерухомої основи.

37. V.V. Avrutov. Gyro North and Latitude Finder / Proceedings of the 25th Anniversary Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 28 - 30 May, 2018. – pp. 384-387. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405912

38. Aksonenko P.M., Avrutov V.V., Lazarev Y.F., Henaff P., Ciarletta L. (2019) Expanded Algorithm for Inertial Navigation. In: Arai K., Kapoor S., Bhatia R. (eds) Intelligent Computing. SAI 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 857. Springer, Cham (Proceedings of the *Computing Conference 2018 10-12 July 2018 | London, UK*). **(Входить до SCOPUS)**. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01177-2_58

Здобувачем запропоновано використання розширеної формули Борца для вирішення проблеми підвищення точності обчислювальних методів БІНС.

39. V. Avrutov, S. Davydenko, V.Tsisarzh. Strapdown Inertial North and Latitude Finder. Proceedings of the DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), September 11-12, 2018 Braunschweig, Germany. – pp. P04-P05. (IEEE Catalog Number: CFP1857W-ART, ISBN: 978-1-5386-6083-6). **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/InertialSensors.2018.8577145

Здобувачем теоретично доведено, що постійні нахили основи не впливають на метод визначення широти, що базується на безплатформовій інерціальній технології.

40. Avrutov V.V., Meleshko V.V., Davydenko S.O. “Latitude Determination on the Strapdown Inertial Technology”. Proceedings of the IEEE/MSNMC-2018, October 16-18, 2018, Kiev, Ukraine, pp.20-23. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/MSNMC.2018.8576261

Здобувачем розроблена математична модель похибки визначення широти місця, яка залежить від похибок акселерометрів та гіроскопів.

41. Avrutov V.V., Lazarev Y.F. “Autonomous Determination of Initial Position Data”/ Proceedings of the 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 27 - 29 May, 2019. – pp. 311-313. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.23919/ICINS.2019.8769393

Здобувачем теоретично обґрунтована ідея автономного визначення крім широти місця, ще й довготи для нерухомого об'єкту.

42. Avrutov V.V., Ryzhkov L.M. “About One Method of Autonomous Determination of the Navigation Parameters”. Proceedings of the IEEE/ APUAVD -2019, October 22-24, 2019, Kiev, Ukraine, pp.214-217. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943835

Здобувачем запропонована ідея автономного визначення широти і довготи місця, для рухомого об'єкта.

43. Buhaiov D.V., Shelever V.M., Avrutov V.V. “Artificial Neural Networks Application to MMG Temperature Calibration”. Proceedings of the IEEE/ APUAVD -2019, October 22-24, 2019, Kiev, Ukraine, pp.44-47. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943908

Здобувачем порівняно різні методи температурного калібрування інерціально-вимірювальних модулів та запропоновано застосування для цього штучних нейронних мереж.

44. V.V. Avrutov, L.M. Ryzhkov, O.A. Sushchenko “Autonomous Determination of Vehicle Longitude”. Proceedings of the 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) - 25-29 Feb. 2020, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 123-126. **(Входить до SCOPUS)**. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235406

Здобувачем розроблена математична модель похибки визначення довготи місця, яка залежить від похибок визначення широти та азимуту.

45. Аврутов В.В., Головач С.В., Косяк М.Р. Скалярний метод контролю і діагностики БІНС. – Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи». 23-24 квітня 2014, Київ, ПБФ НТУУ «КПІ», 2014, с.21-22.

Здобувачем обґрунтована ідея використання скалярного методу калібрування для контролю та діагностування БІНС.

46. Аврутов В.В., Стефанишин З.С., Хутко М.Ю. Калібрування блоку акселерометрів і гіроскопів. – Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи». 17-18 травня 2016, Київ, ПБФ НТУУ «КПІ», 2016, с.30-31.

Здобувачем теоретично обґрунтована ідея просторового калібрування блоку акселерометрів і гіроскопів.

47. Аврутов В.В., Лазарев Ю.Ф., Цисарж В.В. Сравнение точности алгоритмов бесплатформенных инерциальных систем ориентации. – Тези доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи». 6-7 грудня 2016. – КП СП «Арсенал», 2016, с.86-88.

Здобувач запропонував порівняти похибки розширеного та звичайного обчислювальних алгоритмів безплатформових інерціальних систем орієнтації.

48. Аврутов В.В., Шелевер В.М Алгоритм компенсації температурних дрейфів мікромеханічних гіроскопів штучною нейронною мережею. – Збірник наукових праць третьої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи». 4-5 грудня 2018. – КП СП «Арсенал», 2018, с.82-84.

Здобувачем запропоновано для компенсації температурних дрейфів мікромеханічних гіроскопів використовувати штучні нейронні мережі.

49. Аврутов В.В., Бугайов Д.В., Шелевер В.М. Підвищення точності мікромеханічних гіроскопів штучною нейронною мережею. – Збірник тез доповідей XVIII Міжнародної науково-технічної конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи». 15-16 травня 2019, Київ, ПБФ НТУУ «КПІ», 2019, с.23-24.

Здобувач запропонував для підвищення точності мікромеханічних гіроскопів під час температурного калібрування використовувати штучні нейронні мережі.

АНОТАЦІЯ

Аврutow В.В. Розвиток теорії автономного визначення навігаційних параметрів рухомих та нерухомих об'єктів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.03 - гіроскопи та навігаційні системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерство освіти і науки України, Київ, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню наукової проблеми створення теорії нових способів автономного визначення навігаційних параметрів рухомих та нерухомих об'єктів шляхом створення методів визначення широти і довготи за допомогою інерціально-вимірювального модулю на нерухомій основі, визначення широти та довготи та курсу на рухомій основі, що дозволяє в порівнянні з традиційними алгоритмами БІНС обходитися без інтегрування показників акселерометрів, а визначення довготи потребує лише інтегрування показників гіроскопів.

Ключові слова: широта, довгота, курс, азимут, інерціально-вимірювальний модуль, інерціально-навігаційна система, гіроскопи, акселерометри, калібрування, алгоритм контролю та діагностики.

АННОТАЦИЯ

Аврutow В.В. Развитие теории автономного определения навигационных параметров подвижных и не подвижных объектов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.11.03 - гироскопы и навигационные системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Министерство образования и науки Украины, Киев, 2020.

Диссертационная работа посвящена решению научной проблемы создания теории нового автономного определения навигационных параметров подвижных и неподвижных объектов путем создания методов определения широты и долготы с помощью инерциально-измерительного модуля на неподвижном основании, определения широты, долготы и курса на подвижном основании, что позволяет в сравнении с традиционными алгоритмами БИНС обходиться без интегрирования показаний акселерометров, а определение долготы требует только интегрирования показаний гироскопов.

Ключевые слова: широта, долгота, курс, азимут, инерциально-измерительный модуль, инерциально-навигационная система, гироскопы, акселерометры, калибровка, алгоритм контроля и диагностики.

ANNOTATION

Avrutov V.V. Development of the theory of autonomous determination of the navigation parameters of moving and stationary vehicles. – Qualification scientific work manuscript copyright.

Thesis for a degree of Doctor of technical sciences in the Faculty of Instrumentation Engineering by speciality 05.11.03 – Gyroscopes and Navigation Systems. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to solving a scientific problem creation of a theory of new methods for autonomous determination of navigation parameters of moving and stationary objects by creating methods for determining latitude and longitude using an inertial measurement unit on a fixed base, determining latitude, longitude and heading on a moving base, which makes it possible, in comparison with traditional SINS algorithms, to do without integration accelerometers output signals, and determination of longitude requires only the integration of gyroscopes output signals.

The development of autonomous navigation and orientation systems has recently become of great importance. Such autonomous systems are primarily gimbaled inertial navigation systems (INS) and strapdown inertial navigation systems (SINS). The main principle of operation of INS and SINS is double integration of accelerometer output signals, as well as integration of gyroscope output signals into SINS. The presence of errors in accelerometers and gyroscopes leads to a growth in location errors over time.

The first way to increase the accuracy of SINS is to improve their sensitive elements. The second way to increase the accuracy of SINS is to adjust their readings on satellite, astronavigation and other systems. However, such integrated navigation systems are no longer autonomous.

It is important to create such autonomous inertial navigation systems that would not depend on the impressions of satellite and other navigation systems, would have sufficient accuracy and at the same time would have an affordable price. But alas, there is still no theory of such autonomous navigation systems, which would determine the location by different from standard algorithms for double integration of accelerometer readings. That is, there is a problem of creating new ways of autonomous determination of navigation parameters using sensitive elements of medium accuracy. Moreover, for fixed objects the autonomous determination of the initial coordinates or location is relevant, and for the moving ones - the autonomous determination of the location by different from the standard algorithms of double integration of the accelerometer readings. This necessitates the development of new scientifically sound methods and algorithms for autonomous determination of navigation parameters of moving and stationary objects, which would provide acceptable accuracy in determining the location in the conditions of external interference to radio navigation systems.

Keywords: latitude, longitude, heading, azimuth, inertial measurement unit, inertial navigation system, gyroscopes, accelerometers, calibration, control and diagnostic algorithm.